

# Estimation des propriétés de rétention en eau des sols :

Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale

$$\log|\psi| \text{ ou } \log(\psi)$$

A. Bruand(1)(2), P. Pérez Fernández(1)(3), O. Duval(1), P. Quétin(1), B. Nicoullaud(1), H. Gaillard(1), L. Raison(1), J.-F. Pessaud(1) et L. Prud'Homme(1)

(1) INRA, Unité de Science du Sol, Centre de Recherche d'Orléans, BP 20619, 45166 Olivet cedex.

(2) ISTO, Université d'Orléans, Géosciences, BP 6759, 45067 Orléans cedex 2.

(3) Universidade de Santiago de Compostela, Escuela Politecnica Superior, Campus Universitario, 27002 Lugo, Espagne

**Mots clés :** Classification ; porosité ; densité apparente ; modèle ; composition granulométrique ; typologie

**Key-words :** Classification ; porosity ; bulk density ; model ; particle size distribution ; typology.

## Résumé

Un programme de mesures des propriétés de rétention en eau des sols a été développé par l'INRA depuis une dizaine d'années afin de constituer un jeu de données qui puisse être utilisé pour tester les fonctions de pédotransfert (FPT) qui ont été proposées dans la littérature, en établir de nouvelles si celles proposées se révèlent non satisfaisantes et dans ce dernier cas, tester les nouvelles FPT. Dans ce contexte général et partant du constat que les FPT proposées ne permettent pas de prédire les propriétés de rétention en eau de façon satisfaisante, cette étude se propose de suivre une autre voie que celle habituellement suivie pour établir un outil d'estimation des propriétés de rétention en eau. Des classes de pédotransfert (CPT) sont proposées par classe de texture ou par classe combinant texture et structure, cette dernière étant renseignée à l'aide de la densité apparente déterminée sur des mottes de dimensions centimétriques. Ainsi, en utilisant soit la texture seule, soit la texture et la densité apparente de motte, on dispose des teneurs en eau massiques à  $-10$ ,  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$ ,  $-1000$ ,  $-3\ 300$  et  $-15\ 000$  hPa en fonction de l'appartenance de l'horizon à telle ou telle classe de texture ou, telle ou telle classe combinant texture et densité apparente de motte. La qualité de la prédiction a été testée sur un échantillon de validation ; elle a aussi été comparée à celle qui aurait été obtenue si l'on avait utilisé les CPT de Jamagne *et al.* (1977). Par rapport à ces CPT, les résultats montrent une importante réduction du biais et un accroissement de la précision lorsque l'on utilise les CPT par classe de texture proposées dans cette étude. Lorsque l'on compare les CPT par classes texturales aux CPT par classes texturo-structurales, il n'y a pas d'amélioration notable du biais mais celui-ci était déjà très faible

avec les CPT par classes texturales. En revanche, les CPT par classes texturo-structurales, qui permettent de tenir compte à la fois de la texture et de l'état structural du sol, améliorent la précision des prédictions. Pour les CPT par classes texturales, des teneurs en eau volumiques sont déduites des teneurs en eau massiques en utilisant la densité apparente de l'horizon. Les paramètres du modèle de van Genuchten sont donnés pour chaque classe de CPT. Une démarche permettant de prédire les propriétés de rétention en eau d'un horizon est proposée.

## Summary

A research programme about water retention properties of soils has been developed by INRA over the last ten years in order to constitute a set of data enabling discussion of the validity of existing pedotransfer functions (FPT) published in the literature, and if not appropriate to establish new FPT. As performance analysis of the already published FPT showed that they did not performed well it was decided not to establish FPT but pedotransfer classes (CPT). Two sets of data were used for that study : (i) one set of horizons ( $n = 219$ ) collected in soils located mainly in the Paris basin for which water retention properties were measured at  $-10$ ,  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$ ,  $-1000$ ,  $-3\ 300$  and  $-15000$  hPa water potential (Table 1, Figures 1a and 2a), (ii) and another set of horizons ( $n = 217$ ) for which water retention properties were measured at  $-330$  and  $-15\ 000$  hPa (Table 1, Figures 1b and 2b). The set of 219 horizons was used to establish CPT by textural classes (textural CPT) (Table 2) and by classes combining texture and structure (texturo-structural CPT) (Table 3). For the latter, classes of structure were based on bulk density values measured on centimetric clods ( $D^*_{a,m}$ ) instead of at the scale of the horizon ( $D_{a,h}$ ) where large pores without any role in water retention properties are taken into account. The textural and texturo-structural CPT enabled the estimation of gravimetric water content at  $-10$ ,  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$ ,  $-1000$ ,  $-3\ 300$  and  $-15\ 000$  hPa water potential (Tables 2 and 3). We converted the gravimetric water contents estimated with textural CPT into volumetric water contents and then we adjusted the van Genuchten's model for every textural class (Table 8, Figure 3). Thus, a water retention curve is proposed for every textural class. The performance of textural CPT was discussed using the set of 217 horizons. When estimation of the water retained at  $-330$  and  $-15\ 000$  hPa with textural CPT was compared with their estimation with texturo-structural CPT, results showed (i) similar bias but bias was already very small with textural CPT, (ii) and an increase in the estimation accuracy with texturo-structural CPT (Table 4). We compared our textural CPT to those proposed earlier by Jamagne *et al.* (1977). Compared to the latter, our CPT showed a significant decrease in the bias of the estimation and an increase in the estimation accuracy (Table 4). Finally, a flowchart illustrating the method used to estimate the water retention properties with the CPT proposed is discussed (Figure 4).

L'estimation des propriétés de rétention en eau a fait l'objet de très nombreux travaux depuis une trentaine d'années (Tietje et Tapkenhinrichs, 1993; Kern, 1995; Wösten *et al.*, 1995; Bastet *et al.*, 1998). Pour les sols de France, les données publiées par Jamagne *et al.* (1977) constituent encore aujourd'hui la seule étude qui ait proposé des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ainsi qu'une estimation de la réserve utile pour l'ensemble de la gamme de variation de la texture. Parmi les nombreuses études ayant concerné l'estimation des propriétés de rétention en

eau des sols, beaucoup ont eu pour objectif l'établissement de fonctions de pédotransfert (FPT) (Bouma et van Lanen, 1987). Les FPT ont généralement la forme d'une relation mathématique entre une teneur en eau volumique ( $\theta$ ) ou une teneur en eau massique ( $W$ ) à une valeur de potentiel donnée et des caractéristiques du sol aisément accessibles (e.g. Hall *et al.*, 1977 ; Gupta et Larson, 1979 ; Rawls *et al.*, 1982 ; Rawls et Brakensiek, 1983 ; Bruand, 1990 ; Bruand *et al.*, 1994 & 1996). Les FPT peuvent aussi avoir la forme d'une relation mathématique entre d'une part, les paramètres d'un modèle de courbe décrivant les variations de  $\theta$  en fonction du potentiel et, d'autre part, des caractéristiques du sol aisément accessibles (De Jong *et al.*, 1983 ; Cosby *et al.*, 1984 ; Rawls et Brakensiek, 1985 ; Saxton *et al.*, 1986 ; Vereecken *et al.*, 1989). De telles caractéristiques sont le plus souvent la composition granulométrique, la teneur en carbone organique et la densité apparente du sol. Les FPT étant le plus souvent établies par régression multilinéaire, elles correspondent à autant de modèles empiriques de la relation pouvant exister entre la composition d'un sol et ses propriétés de rétention en eau. La synthèse bibliographique publiée par Bastet *et al.* (1998) a par ailleurs montré que les FPT proposées dans la littérature avaient été établies à partir de mesures réalisées sur des sols dont on ne connaît la composition que de façon très imprécise. De surcroît, depuis leur publication, seules quelques études ont cherché à préciser la qualité des prédictions effectuées en les utilisant sans d'ailleurs pouvoir comparer les caractéristiques des sols sur lesquels elles étaient testées à celles des sols à partir desquels elles avaient été établies. Bastet *et al.* (1999) ont eux aussi testé un ensemble de FPT parmi les plus utilisées et ainsi calculé les propriétés de rétention en eau d'un ensemble de sols issus du bassin de Paris et de la Région Languedoc-Roussillon. La comparaison des teneurs en eau calculées à celles mesurées a montré que l'erreur moyenne de prédiction était fréquemment supérieure en valeur absolue à 0,04 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Fort de ce constat, des FPT ont par la suite été établies à partir du même ensemble de sols (Bastet, 1999) mais leur validité n'a pas pu être encore testée, ne disposant pas d'un jeu de mesures indépendant. Tout en partant d'un jeu de données proche de celui utilisé par Bastet (1999), notre objectif est ici de suivre une autre voie pour établir un outil d'estimation des propriétés de rétention en eau des sols. Nous procéderons en suivant une démarche qui s'apparente à celle suivie par Jamagne *et al.* (1977) mais nous couplerons cette fois à la stratification texturale telle qu'ils l'ont pratiquée, une stratification qui tient compte de la structure.

### **Présentation de la démarche suivie**

Nous sommes partis de l'idée maintenant bien établie selon laquelle la quantité d'eau retenue à une valeur de potentiel dépend de la nature des constituants et de leur mode d'assemblage. Une façon de procéder pour améliorer la qualité des prédictions consiste alors à tenir compte à la fois de ces deux aspects. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la plupart des FPT prennent en compte d'une part la composition granulométrique et la teneur en carbone organique (nature des constituants) et d'autre part, la densité apparente (mode d'assemblage des constituants). En procédant de la sorte, les auteurs considèrent implicitement que ces deux ensembles de caractéristiques sont indépendants et qu'ils interviennent de façon additive, seuls leurs poids relatifs variant en fonction des valeurs de potentiel. Or la densité apparente n'est pas indépendante de la composition granulométrique et de la teneur en carbone organique. De plus, les FPT

proposées n'utilisent pas des caractéristiques du sol exprimées dans un système cohérent. En effet, la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) et la densité apparente ( $D_a$ ) sont rapportées à un volume de sol alors que les teneurs en argile, limon, sable et carbone organique sont rapportées à une masse de sol séché à 105 °C. Or la masse de sol sec n'est pas constante dans le volume de sol de référence utilisé pour exprimer  $\theta$  et  $D_a$  dès lors que  $D_a$  varie. Plutôt que de chercher à améliorer les FPT proposées dans la littérature, nous avons choisi de tenir compte du fait que la texture et la densité apparente n'étaient pas des caractéristiques indépendantes et qu'il était nécessaire d'en tenir compte de façon explicite dans la démarche conduisant à l'établissement d'outils d'estimation des propriétés de rétention en eau. Nous avons ainsi défini lors d'une première étape des classes sur des critères de composition granulométrique (classes de texture) puis, lors d'une seconde, des classes de densité apparente (classes de structure) au sein de chaque classe de texture. Ainsi, pour aboutir à des valeurs de teneur en eau à différentes valeurs de potentiel et tout en tenant compte des classes de texture et de structure, nous avons : (i) Réparti les horizons dans différentes classes de texture en fonction de leur composition granulométrique (stratification texturale) ; (ii) Calculé au sein de chaque classe de texture les teneurs en eau moyennes massiques aux différentes valeurs de potentiel ; (iii) Puis réparti les horizons appartenant à chaque classe de texture dans des sous-classes en fonction de la densité apparente mesurée sur des mottes de dimensions centimétriques, c'est-à-dire à une échelle à laquelle les pores pris en compte sont effectivement ceux qui sont actifs vis-à-vis de la rétention de l'eau (stratification texturo-structurale) ; (iv) Calculé au sein de chaque sous-classe obtenue après stratification texturo-structurale les teneurs en eau moyennes massiques aux différentes valeurs de potentiel ; (v) Et enfin, calculé les teneurs en eau volumiques moyennes à partir des teneurs en eau massiques en utilisant une valeur de densité apparente à l'échelle de l'horizon qui est déduite de celle mesurée sur motte.

En procédant de la sorte, la teneur en eau massique aux différents potentiels est exprimée, comme les teneurs en argile, limon et sable, par rapport à la masse de l'échantillon séché à 105 °C. La densité apparente déterminée à l'échelle de mottes de dimensions centimétriques est utilisée comme estimateur de l'état structural mais sa signification peut varier en fonction de la classe de texture. En effet, une  $D_a$  de 1,7 n'a pas la même signification en terme de structure pour un sol argileux et pour un sol sableux. Par ailleurs, la densité apparente utilisée comme second critère de stratification n'est pas celle que l'on peut mesurer à l'échelle de l'horizon et qui varie en partie en fonction de pores qui n'ont aucun rôle vis-à-vis de la rétention de l'eau par le sol, mais celle que l'on mesure à l'échelle de volumes de dimensions centimétriques. A cette échelle, les pores de grande taille du sol ne sont en effet pas pris en compte. Les teneurs en eau ainsi prédites sont des teneurs en eau massiques qui sont *in fine* transformées en teneurs en eau volumiques de façon à proposer des valeurs de teneurs en eau qui sont celles qui intéressent les utilisateurs. Les classes ainsi définies en fonction de la composition granulométrique et de la densité apparente, et pour lesquelles nous proposons des valeurs de teneur en eau à différents potentiels, constituent des classes de pédotransfert (CPT). Notons à ce propos que les classes de texture proposées par Jamagne *et al.* (1977) constituaient déjà autant de CPT qu'il y avait de classes de texture.

## **Les sols étudiés**

### **L'ensemble d'horizons utilisé pour établir les CPT (échantillon de départ)**

Les déterminations ont porté sur 219 horizons dont 58 horizons A (dont 54 sont des horizons Ap), 16 horizons E, 98 horizons B et 47 horizons C. Les sols échantillonnés sont situés dans leur grande majorité dans le bassin de Paris, et secondairement les marais de l'Ouest et le piémont pyrénéen (*figure 1a*). Ces sols sont développés dans différents matériaux parentaux: des formations sédimentaires argileuses ou marneuses (46 horizons), des formations résiduelles sur séries sédimentaires calcaires (2 horizons), des alluvions de textures très variées (24 horizons), des colluvions (13 horizons), des alluvions anciennes (28 horizons) et des formations superficielles limoneuses (106 horizons). Les horizons étudiés ne possédaient pas ou très peu d'éléments grossiers et la gamme de variation de la texture couvre l'ensemble des classes de texture du triangle proposé par le Service de cartographie des sols de l'Aisne (Jamagne, 1967) excepté les textures LL et LLS (*figure 2a*). Les caractéristiques de la fraction  $< 2$  mm sont reportées dans le *tableau 1*.

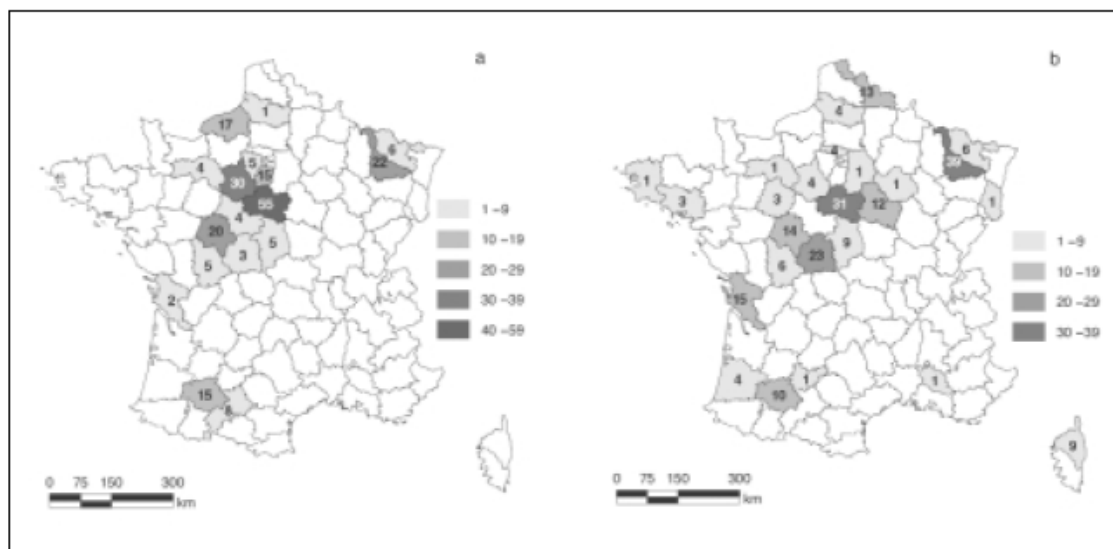
### **L'ensemble d'horizons utilisé pour tester les CPT (échantillon de validation)**

Un second ensemble de 217 horizons a été utilisé pour discuter la validité des CPT proposées pour estimer les teneurs en eau à  $-330$  hPa ( $W_{2,5}$ ) et  $-15000$  hPa ( $W_{4,2}$ ). Cet ensemble d'horizons est issu d'une aire géographique plus large que celle dont sont issus les horizons utilisés pour établir les CPT (*figure 1b*). Il est composé d'horizons possédant des caractéristiques de constitution sensiblement différentes de celles déterminées pour les horizons de l'échantillon de départ ayant été utilisé pour établir les CPT (*figure 2b, tableau 1*). En effet, les teneurs moyennes en argile et sable sont respectivement supérieures (+10,8%) et inférieures (-7,9%) à celles de l'échantillon de départ. La capacité d'échange cationique moyenne est supérieure (+3,2 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>) ainsi que les teneurs en eau moyennes à  $-330$  hPa (+0,047 g g<sup>-1</sup>) et  $-15000$  hPa (+0,048 g g<sup>-1</sup>). Les teneurs moyennes en carbone organique sont en revanche sensiblement les mêmes (5,6 et 5,3 g kg<sup>-1</sup>).

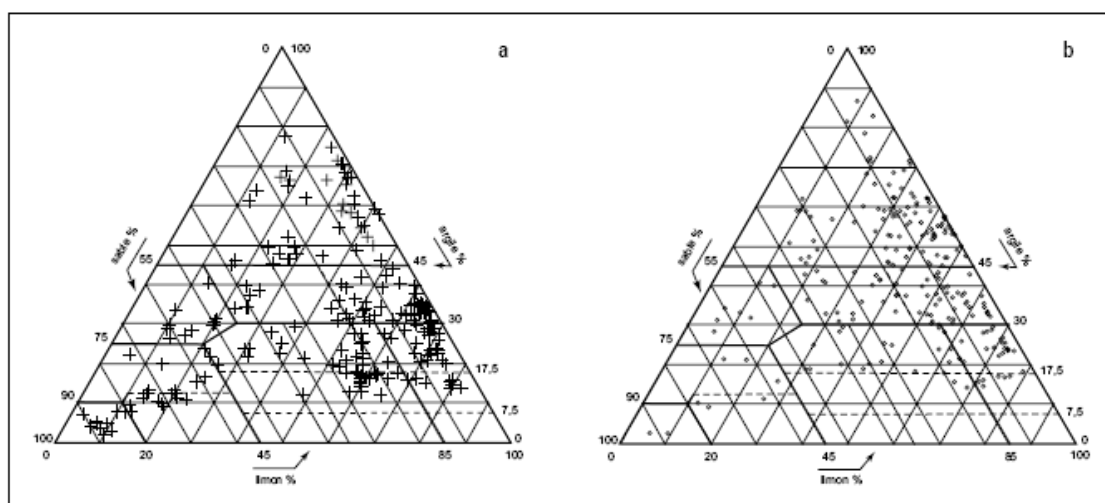
## **Les Méthodes mises en oeuvre**

Les échantillons ont été prélevés en hiver sous la forme de volumes non perturbés de 100 à 1000 cm<sup>3</sup> lorsque le sol se trouvait dans un état hydrique proche de la capacité au champ. Ces volumes de sol ont ensuite été conservés à la teneur en eau correspondant à leur état lors du prélèvement, dans des boîtes hermétiques et à une température de l'ordre de 4 – 5 °C de façon à réduire l'activité biologique. Les déterminations ont porté sur des mottes de dimensions centimétriques (5 à 10 cm<sup>3</sup>) obtenues par fragmentation à la main à partir des mottes prélevées. La densité apparente des mottes ( $D_{a,m}$ ) dans l'état correspondant à celui lors du prélèvement a été mesurée à l'aide de la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973) excepté pour certains horizons sablo-argileux, sablo-limoneux et sableux. Pour ces horizons,  $D_{a,m}$  a été déduite des mesures effectuées sur des cylindres de volume proche de celui des mottes. Sept teneurs en eau massiques ( $W$ ) ont été déterminées pour des valeurs de potentiel de  $-10$  hPa ( $W_{1,0}$  à pF = 1,0),  $-33$  hPa ( $W_{1,5}$  à pF = 1,5),  $-100$  hPa ( $W_{2,0}$  à pF = 2,0),  $-330$  hPa ( $W_{2,5}$  à pF = 2,5),  $-1000$  hPa ( $W_{3,0}$  à pF = 3,0),  $-3300$  hPa ( $W_{3,5}$  à pF = 3,5) et  $-15000$  hPa ( $W_{4,2}$  à pF = 4,2). Les

déterminations ont été réalisées en utilisant des dispositifs pneumatiques. Les mottes ont été disposées sur une pâte de kaolinite préalablement ressuyée à  $-10^2$  hPa de façon à établir une continuité satisfaisante entre l'eau de l'échantillon et la membrane ou la plaque poreuse du dispositif (Bruand *et al.*, 1996). Ce dispositif, qui s'apparente à celui qui a été utilisé par Tessier et Berrier (1979), permet la dessiccation comme la réhumectation des échantillons. Il permet de mettre à l'équilibre 30 à 40 mottes à la fois dans une seule cellule.



**Figure 1** – Localisation des sols étudiés (nombre d'horizons par département) pour établir les FPT (a) et tester leur validité (b).



**Figure 2** – Texture des horizons utilisés pour établir les classes de fonctions de pédotransfert (CPT) (a) et de ceux utilisés pour tester leur validité (b).

La teneur en eau est mesurée après dix jours de mise à l'équilibre avec la pression choisie puis passage à l'étuve à 105 °C pendant au moins 24 heures. Dix jours sont en effet nécessaires pour que les mottes atteignent l'équilibre quels que soient le potentiel de l'eau fixé et la composition des horizons étudiés. Pour chaque détermination, la teneur en eau correspond à la moyenne donnée par 10 à 15 mottes. Les écarts type sur la moyenne varient le plus souvent entre 0,003 et 0,008 g g<sup>-1</sup>. Il apparaît aussi que la teneur en eau lors du prélèvement est généralement proche de celle obtenue pour un potentiel de -100 hPa (pF = 2,0) (*Annexe I*). De la sorte, les teneurs en eau obtenues pour les potentiels de -10 et -33 hPa le sont en réhumectation alors que celles obtenues pour les potentiels de -330, -1000, -3300 et -15000 hPa le sont en dessiccation.

	Granulométrie $\mu\text{m}$ Carbone			CaCO <sub>3</sub> organique	CEC	D <sub>a</sub>		Teneur en eau						
	<2	2-50	50-2000	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>e</sub> kg <sup>-1</sup>	g cm <sup>3</sup>	W <sub>1,0</sub>	W <sub>1,5</sub>	W <sub>2,0</sub>	W <sub>2,5</sub>	W <sub>3,0</sub>	W <sub>3,5</sub>	W <sub>4,2</sub>
	%	%	%					g g <sup>-1</sup>			g g <sup>-1</sup>			
Ensemble d'horizons utilisés pour établir les CPT (n = 219)														
Moyenne	31,3	44,1	24,6	5,6	13	16,0	1,59	0,237	0,228	0,216	0,198	0,176	0,156	0,128
Ecart type	17,0	21,3	24,7	4,2	61	7,8	0,15	0,067	0,068	0,069	0,069	0,069	0,071	0,058
Minimum	1,9	2,8	0,2	0,4	0	0,8	1,15	0,083	0,072	0,047	0,033	0,029	0,021	0,008
Maximum	77,5	82,1	90,1	21,8	466	39,2	1,88	0,473	0,463	0,454	0,435	0,424	0,380	0,295
Ensemble d'horizons utilisés pour tester les CPT (n = 217)														
Moyenne	42,1	41,1	16,7	5,3	30	19,2	1,54	-	-	-	0,245	-	-	0,176
Ecart type	16,2	18,6	18,1	4,5	71	8,4	0,15	-	-	-	0,067	-	-	0,061
Minimum	2,5	5,9	0	0,8	0	2,9	1,20	-	-	-	0,039	-	-	0,014
Maximum	86,7	79,4	87,9	3,9	544	47,4	1,90	-	-	-	0,395	-	-	0,310

**Tableau 1** - Caractéristiques de l'ensemble d'horizons utilisés pour établir les classes de pédotransfert (CPT) et de celui utilisé pour la validation.

Pour discuter la validité des classes de pédotransfert établies, nous avons calculé l'erreur moyenne de prédiction (EMP) définie par :

$$EMP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{pi} - W_{mi})$$

avec n, nombre d'horizons, W<sub>pi</sub>, teneur en eau massique prédite, W<sub>mi</sub>, teneur en eau massique mesurée. L'estimation est d'autant moins biaisée que EMP est proche de 0. Par ailleurs, les classes de pédotransfert surestiment la teneur en eau lorsque EMP est positif et la sous-estiment lorsque EMP est négatif. Nous avons aussi calculé l'écart-type de prédiction (ETP) défini par :

$$ETP = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(W_{pi} - W_{mi}) - EMP]^2 \right]^{1/2}$$

L'écart-type de prédiction renseigne sur la précision de l'estimation. Cette précision est d'autant plus élevée que ETP est faible.

## Résultats et Discussion

Nous allons successivement discuter la qualité de la prédiction de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement obtenue à l'aide des CPT de Jamagne *et al.* (1977) lorsqu'elles sont appliquées aux horizons composant l'échantillon de départ, puis, compte tenu de la médiocre qualité de cette prédiction, établir de nouvelles CPT à l'aide de l'échantillon de départ et enfin, tester ces CPT sur un échantillon de validation et comparer la qualité de la prédiction avec celle qui est obtenue lorsque l'on utilise les CPT de Jamagne *et al.* (1977).

### Validité des CPT proposées par Jamagne

L'ensemble d'horizons composant l'échantillon de départ a par conséquent été utilisé dans un premier temps pour discuter de la validité des teneurs en eau massiques ( $\text{g g}^{-1}$ ) à la capacité au champ et au point de flétrissement proposées par Jamagne *et al.* (1977). La capacité au champ ne correspond pas à un état d'équilibre et par conséquent pas à une valeur de potentiel. Cependant, nous avons observé que la teneur en eau lors du prélèvement en conditions proches de la capacité au champ correspondait fréquemment à une teneur en eau légèrement supérieure à celle obtenue à  $-100 \text{ hPa}$  ( $pF = 2,0$ ). Nous admettons ici que la teneur en eau à  $-100 \text{ hPa}$  peut être considérée comme étant une approximation de la teneur en eau à la capacité au champ. La teneur en eau à la capacité au champ proposée par ces auteurs a alors été comparée à celle déterminée à  $-100 \text{ hPa}$  (*Annexe I*). L'erreur moyenne de prédiction, toutes textures réunies, est de  $0,054 \text{ g g}^{-1}$  et la précision de  $0,028 \text{ g g}^{-1}$ . Les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) conduisent donc à une surestimation de la teneur en eau à la capacité au champ. L'analyse détaillée par classe de texture montre que c'est pour les textures argileuses que le biais est le plus élevé (*Annexe I*). Le biais étant trop élevé pour la plupart des classes de texture, les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) ne peuvent pas être considérées pour les sols étudiés ici comme satisfaisantes pour l'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ. La teneur en eau au point de flétrissement proposée par Jamagne *et al.* (1977) a été comparée à celle déterminée à  $-15000 \text{ hPa}$  (*Annexe I*). L'erreur moyenne de prédiction, toutes textures réunies, est de  $0,024 \text{ g g}^{-1}$  et la précision de  $0,018 \text{ g g}^{-1}$ . Si l'erreur moyenne de prédiction, toutes textures réunies, est inférieure à celle enregistrée pour la capacité au champ, elle reste trop élevée pour que les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) soient utilisées pour l'estimation de la teneur en eau au point de flétrissement des sols étudiés ici.

### Établissement de CPT sur la base des déterminations réalisées sur mottes

Pour chaque classe de texture, nous avons calculé à partir de l'échantillon de départ les valeurs moyennes de  $W$  aux différents potentiels, l'écart type associé à cette moyenne ainsi que les valeurs minimum et maximum (*tableau 2*). Plusieurs classes de texture ont été regroupées afin de disposer d'un effectif supérieur à 10 horizons par classe. Chaque fois que ces classes de textures seront utilisées, nous donnerons entre parenthèses les abréviations correspondant aux classes de texture du triangle proposé par Jamagne (1967) afin d'éviter toute confusion. Ainsi, pour chaque classe de texture nouvellement définie, on dispose d'une série de valeurs de  $W$  pour les valeurs de potentiel  $-10$ ,  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$ ,  $-1000$ ,  $-3300$  et  $-15000 \text{ hPa}$ . Ces séries de valeurs constituent autant de CPT pour estimer  $W$  après stratification texturale (*tableau 2*).



Texture	Effectif	Teneur en eau aux différents potentiels $W_{log\psi}$						
		$W_{1,0}$	$W_{1,5}$	$W_{2,0}$	$W_{2,5}$	$W_{3,0}$	$W_{3,5}$	$W_{4,2}$
		g g <sup>-1</sup>						
Argile lourde (ALO)	45	0,327	0,321	0,310	0,295	0,277	0,262	0,216
Argile (A, AL)	58	0,225	0,220	0,209	0,197	0,182	0,163	0,140
Argile sableuse (AS)	9	0,198	0,193	0,181	0,173	0,160	0,145	0,123
Limon (LM, LA)	37	0,237	0,227	0,217	0,195	0,161	0,126	0,103
Limon sableux (LMS, LAS)	32	0,214	0,207	0,195	0,172	0,141	0,114	0,090
Limon très sableux (LS, LSA)	10	0,192	0,182	0,168	0,152	0,137	0,116	0,094
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	17	0,182	0,166	0,146	0,122	0,101	0,085	0,067
Sable (S)	11	0,152	0,125	0,092	0,076	0,059	0,049	0,037

$W_{log\psi}$ : Teneur en eau massique au potentiel de l'eau  $\psi$  (hPa).

**Tableau 2** – Teneur en eau massique moyenne (g g<sup>-1</sup>) aux différentes valeurs de potentiel et pour chaque classe de texture (Classes de pédotransfert après stratification texturale).

Dans un second temps, nous avons réparti les horizons dans des classes combinant texture et densité apparente de façon à prendre en compte des variations de composition granulométrique et de mode d'assemblage des constituants (*tableau 3 et Annexe II*), et nous avons calculé les valeurs moyennes de  $W$  aux différents potentiels, l'écart type associé, et les valeurs minimum et maximum. Rappelons que les valeurs de densité apparente prises en compte ici sont celles déterminées sur motte ( $D_{a,m}$ ) et que les pores pris en compte interviennent par conséquent dans leur grande majorité dans les propriétés de rétention en eau. Les limites de classes de  $D_{a,m}$  ont été fixées arbitrairement et la gamme de variation de  $D_{a,m}$  au sein de chaque classe ( $\Delta D_{a,m} = 0,10, 0,15$  ou  $0,20$ ) a été fixée de façon à disposer d'un nombre suffisant d'horizons par classe de  $D_{a,m}$  (*tableau 3*). Ainsi, pour chaque classe combinant variation de texture et de structure, on dispose d'une série de valeurs de  $W$  pour les valeurs de potentiel  $-10, -33, -100, -330, -1000, -3300$  et  $-15000$  hPa. Ces séries de valeurs constituent alors autant de CPT pour estimer  $W$  après stratification texturo-structurale.

### Validité des CPT établies pour les teneurs en eau à $-330$ et $-15\ 000$ hPa

Si l'on compare les teneurs en eau déterminées pour les horizons constituant l'échantillon de validation à la teneur en eau moyenne des sols composant l'échantillon ayant servi à l'établissement des CPT, on enregistre une sous-estimation de la teneur en eau de  $0,042$  g g<sup>-1</sup> à  $-330$  et  $-15000$  hPa (*tableau 4*). Cette sous-estimation est vraisemblablement due à la nature plus argileuse des horizons constituant l'échantillon test (teneur en argile moyenne supérieure de  $10,8\%$ ). Quant à la précision, elle est légèrement plus élevée à  $-15000$  hPa ( $0,068$  g g<sup>-1</sup>) qu'elle ne l'est à  $-330$  hPa ( $0,074$  g g<sup>-1</sup>).

### Validité des CPT établies après stratification texturale

Après stratification par classe de composition granulométrique, les CPT sous-estiment globalement la teneur en eau à  $-330$  et  $-15000$  hPa de respectivement  $0,006$  et  $0,009$  g

g<sup>-1</sup> (tableau 4). Quant à la précision, elle est de respectivement 0,036 et 0,028 g g<sup>-1</sup> pour ces deux valeurs de potentiel. Si l'on analyse les résultats par classe de texture, on observe qu'il y a sous-estimation de W<sub>4,2</sub> quelle que soit la classe de texture (tableau 4). W<sub>2,5</sub> est en revanche faiblement surestimé pour les classes de texture Sable argilo-limoneux (SL et SA) et Sable (S) alors qu'il est sous-estimé pour l'ensemble des autres classes de texture. Quant à la précision de cette estimation, elle varie de 0,012 à 0,044 g g<sup>-1</sup> à -330 hPa et de 0,015 à 0,033 g g<sup>-1</sup> à -15000 hPa.

### Validité des CPT établies après stratification texturostructurale

Après stratification par classe de composition granulométrique et densité apparente, les CPT conduisent à des EMP globalement identiques à celles obtenues après stratifications texturale puisque, toutes textures confondues, elles sont identiques à celles obtenues à -330 et -15000 hPa (tableau 4). Le biais de l'estimation n'a donc pas été réduit en tenant compte de l'état structural des sols mais celui-ci était déjà très faible après stratification texturale puisque de l'ordre de grandeur de la variabilité enregistrée sur les mesures de teneur en eau à -330 et -15 000 hPa. En revanche, en tenant compte de l'état structural des sols, on améliore la précision de l'estimation. L'écart type de prédiction passe de 0,036 à 0,020 g g<sup>-1</sup> à -330 hPa et de 0,028 à 0,021 g g<sup>-1</sup> à -15000 hPa. Il a par conséquent été réduit de respectivement 44 et 25 %.

Classe de texture	Classe de $D_{a,m}$	$D_{a,m}^*$	Teneur en eau massique $W_{\psi_{\text{app}}}$						
			W <sub>1,0</sub>	W <sub>1,5</sub>	W <sub>2,0</sub>	W <sub>2,5</sub>	W <sub>3,0</sub>	W <sub>3,5</sub>	W <sub>4,2</sub>
Argile lourde (ALO)	[1,2-1,3]	1,25	0,430	0,417	0,400	0,378	0,352	0,342	0,264
	]1,3-1,4]	1,36	0,350	0,346	0,334	0,317	0,296	0,280	0,226
	]1,4-1,5]	1,45	0,331	0,322	0,311	0,299	0,278	0,261	0,217
	]1,5-1,6]	1,54	0,259	0,255	0,250	0,241	0,225	0,209	0,185
	]1,6-1,7]	1,66	0,228	0,219	0,211	0,202	0,192	0,182	0,161
Argile (A, AL)	[1,4-1,5]	1,46	0,263	0,252	0,237	0,219	0,196	0,170	0,149
	]1,5-1,6]	1,56	0,234	0,230	0,209	0,207	0,188	0,165	0,144
	]1,6-1,7]	1,65	0,227	0,218	0,209	0,199	0,182	0,163	0,138
	]1,7-1,8]	1,74	0,199	0,198	0,188	0,175	0,170	0,163	0,137
	]1,8-1,9]	1,82	0,171	0,167	0,160	0,153	0,155	0,150	0,126
Argile sableuse (AS)	[1,5-1,7]	1,63	0,224	0,213	0,203	0,198	0,175	0,162	0,129
	]1,7-1,9]	1,77	0,185	0,182	0,171	0,161	0,152	0,136	0,120
Limon (LM, LA)	[1,4-1,5]	1,44	0,266	0,252	0,242	0,210	0,161	0,126	0,107
	]1,5-1,6]	1,56	0,238	0,227	0,220	0,195	0,163	0,126	0,105
	]1,6-1,7]	1,63	0,225	0,218	0,208	0,194	0,161	0,128	0,105
Limon sableux (LMS, LAS)	[1,5-1,6]	1,57	0,229	0,222	0,202	0,167	0,135	0,122	0,103
	]1,6-1,7]	1,64	0,215	0,209	0,197	0,176	0,143	0,110	0,087
	]1,7-1,8]	1,73	0,185	0,172	0,176	0,167	0,140	0,119	0,078
Limon très sableux (LS, LSA)	[1,5-1,7]	1,60	0,209	0,194	0,176	0,154	0,134	0,114	0,100
	]1,7-1,9]	1,79	0,176	0,169	0,160	0,150	0,140	0,117	0,089
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	[1,6-1,75]	1,70	0,182	0,170	0,151	0,126	0,107	0,088	0,072
	]1,75-1,9]	1,82	0,173	0,162	0,143	0,123	0,101	0,086	0,065
Sable (S)	[1,6-1,7]	1,67	0,169	0,139	0,099	0,085	0,068	0,052	0,037
	]1,7-1,8]	1,75	0,135	0,118	0,076	0,061	0,043	0,038	0,033

$D_{a,m}$  : classe de densité apparente de motte ;  $D_{a,m}^*$  : densité apparente de motte moyenne des horizons appartenant à la classe de  $D_{a,m}$  ;  $W_{\psi_{\text{app}}}$  : teneur en eau massique au potentiel  $\psi$ .

**Tableau 3 – Teneur en eau massique moyenne aux différents potentiels de l'eau en fonction de la classe de texture et de la classe de densité apparente de motte (Classes de pédotransfert après stratification texturo-structurale).**

	n	Erreur moyenne de prédiction (EMP) g g <sup>-1</sup>		Ecart type de prédiction (ETP) g g <sup>-1</sup>	
		-330 hPa	-15 000 hPa	-330 hPa	-15 000 hPa
Toutes textures réunies et sans stratification	217	-0,042	-0,042	0,075	0,069
Après stratification texturale mais sans stratification structurale					
Argile lourde (ALO)	98	-0,002	-0,009	0,044	0,033
Argile (A, AL)	55	-0,014	-0,010	0,031	0,025
Argile sableuse (AS)	7	-0,004	-0,009	0,030	0,026
Limon (LM, LA)	30	-0,004	-0,007	0,019	0,020
Limon sableux (LMS, LAS)	13	-0,009	-0,011	0,022	0,027
Limon très sableux (LS, LSA)	6	-0,008	-0,001	0,012	0,015
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	6	0,001	-0,012	0,034	0,027
Sable (S)	2	0,005	-0,004	0,032	0,027
Toutes textures réunies	217	-0,006	-0,009	0,036	0,028
Après stratification texturale et structurale					
Argile lourde (ALO)	98	-0,003	-0,011	0,020	0,021
Argile (A, AL)	55	-0,013	-0,010	0,021	0,021
Argile sableuse (AS)	7	-0,000	-0,008	0,009	0,011
Limon (LM, LA)	30	-0,003	-0,005	0,018	0,021
Limon sableux (LMS, LAS)	13	-0,010	-0,013	0,012	0,022
Limon très sableux (LS, LSA)	6	-0,008	-0,010	0,011	0,024
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	6	0,008	-0,013	0,029	0,027
Sable (S)	2	-0,034	-0,008	0,032	0,027
Toutes textures réunies	217	-0,006	-0,009	0,020	0,021

**Tableau 4** – Validité des classes de fonctions de pédotransfert établies à partir d'une stratification par classe de texture (stratification texturale), puis à partir d'une stratification par classe de texture et classe de densité apparente de motte (stratification texturale et structurale).

Si l'on analyse les résultats par classe de texture, on observe une forte augmentation du biais pour la texture S mais il ne s'agit que de deux horizons (*tableau 4*). C'est pour les textures Argile lourde (ALO) et Argile (A, AL) que l'amélioration de la précision est la plus sensible. C'est aussi pour ces textures que l'on a la gamme la plus large de densité apparente (*Annexes II et IV*). L'écart type de prédiction passe pour la texture Argile lourde de 0,044 à 0,020 g g<sup>-1</sup> à -330hPa et de 0,033 à 0,021 g g<sup>-1</sup> à -15000 hPa. Pour la texture Argile, il passe de 0,031 à 0,021 g g<sup>-1</sup> à -330hPa et de 0,025 à 0,021 g g<sup>-1</sup> à -15000 hPa. Cette amélioration de la précision est en accord avec les résultats obtenus à propos des propriétés de rétention en eau des sols argileux; ceux-ci ont en effet montré la nécessité de prendre en compte l'état structural des horizons lors de l'estimation de leur propriétés de rétention en eau (Bruand *et al.*, 1996; Bruand et Tessier, 2000).

#### **Comparaison avec l'estimation réalisée avec les CPT de Jamagne *et al.* (1977)**

Seules les valeurs estimées à -15000 hPa ont été comparées à celles proposées par Jamagne *et al.* (1977). En effet, comme nous l'avons rappelé plus haut, la capacité au champ ne correspondant pas à une valeur de potentiel déterminée (*Annexe I*), les

valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) pour la capacité au champ n'ont pas été comparées à la teneur en eau estimée à  $-330$  hPa. Pour la teneur en eau à  $-15000$  hPa et en prenant en compte l'ensemble des textures, si nous n'avions pas utilisé les CPT proposées dans le *tableau 4* mais en revanche les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977), nous aurions obtenu une estimation faiblement surestimée de  $W_{4,2}$  ( $EMP = 0,006 \text{ g g}^{-1}$ ) (*tableau 5*) alors qu'elle est faiblement sous estimée ( $EMP = -0,009 \text{ g g}^{-1}$ ) avec les CPT que nous proposons (*tableau 4*). En revanche, l'écart type de prédiction est largement supérieur ( $ETP = 0,039 \text{ g g}^{-1}$ ) lorsque l'on utilise les CPT proposées par Jamagne *et al.* (1977) à sa valeur lorsque l'on utilise les CPT proposées dans cette étude ( $ETP = 0,028 \text{ g g}^{-1}$ ) (*tableaux 4 et 5*). Ces résultats globaux correspondent en fait à des résultats très différents lorsqu'ils sont analysés pour chaque classe de texture. Ainsi, l'utilisation des valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) conduit à une forte surestimation de  $W_{4,2}$  pour les classes de texture AS ( $0,088 \text{ g g}^{-1}$ ) et A ( $0,103 \text{ g g}^{-1}$ ), ainsi qu'à une nette sous-estimation ( $-0,046 \text{ g g}^{-1}$ ) ou surestimation ( $0,029 \text{ g g}^{-1}$ ) pour la classe de texture ALO lorsque le sol est développé respectivement soit sur argile sédimentaire, soit sur argile d'altération. Pour les autres classes de texture, le biais est en valeur absolue plus faible mais encore le plus souvent supérieur à celui enregistré avec les CPT proposées dans cette étude. Quant à la précision de l'estimation, elle est pour la plupart des classes de texture largement inférieure à celle enregistrée avec les CPT proposées dans cette étude, en particulier pour les classes de texture Argile (A, AL) et Argile lourde (ALO).

### Teneurs en eau volumiques

Des teneurs en eau volumiques ( $\square$ ) à  $-10$ ,  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$ ,  $-1000$ ,  $-3300$  et  $-15000$  hPa ont été calculées en utilisant : (i) Au sein de chaque classe de composition granulométrique (classes texturales), les teneurs en eau massiques ( $W$ ) (*tableau 2*) et une valeur moyenne de densité apparente à l'échelle de l'horizon ( $D_{a,h}$ ).  $D_{a,h}$  est déduite de la densité apparente moyenne mesurée sur motte ( $D_{a,m}^*$ ). Nous avons considéré deux sous cas, celui où  $D_{a,h}$  peut être considérée comme étant proche de  $D_{a,m}^*$  lorsqu'il y a peu à très peu de macroporosité, et celui où  $D_{a,h}$  peut être considéré comme inférieur à  $D_{a,m}^*$  en raison de la présence d'une macroporosité significative (*Annexe III*). Dans le premier cas, nous avons choisi la valeur de  $D_{a,h}$  correspondant à celle de  $D_{a,m}^*$  arrondie au dixième inférieur (*tableau 6*). Dans le second, nous avons considéré que  $D_{a,h}$  était égal à cette valeur de  $D_{a,m}^*$  arrondie au dixième inférieur et diminuée de  $0,1$  (*tableau 6*). (ii) Et au sein de chaque classe de composition granulométrique et densité apparente de motte (classes texturo-structurales), les teneurs en eau massiques ( $W$ ) (*tableau 3*) et une valeur moyenne de densité apparente à l'échelle de l'horizon ( $D_{a,h}$ ) pour ceux appartenant à la classe considérée. Comme précédemment, nous avons considéré deux sous cas, celui où  $D_{a,h}$  peut être considérée comme égale à  $D_{a,m}$  lorsqu'il y a peu à très peu de macroporosité, et celui où  $D_{a,h}$  peut être considérée comme inférieure à  $D_{a,m}$  en raison de la présence d'une macroporosité significative et nous avons alors introduit le cas où  $D_{a,h} = D_{a,m} - 0,1$  (*tableau 7*). A partir des valeurs de  $\square$  calculées après stratification texturale, nous avons ajusté le modèle de courbe proposé par van Genuchten (1980) à l'aide du programme RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) (*figure 3*). Les paramètres du modèle sont donnés dans le *tableau 8* et les courbes correspondantes sont présentées *figure 3* pour chaque classe de texture. La

même procédure peut être appliquée aux valeurs de  $\theta$  calculées après stratification texturo-structurale.

### Utilisation des classes de CPT proposées

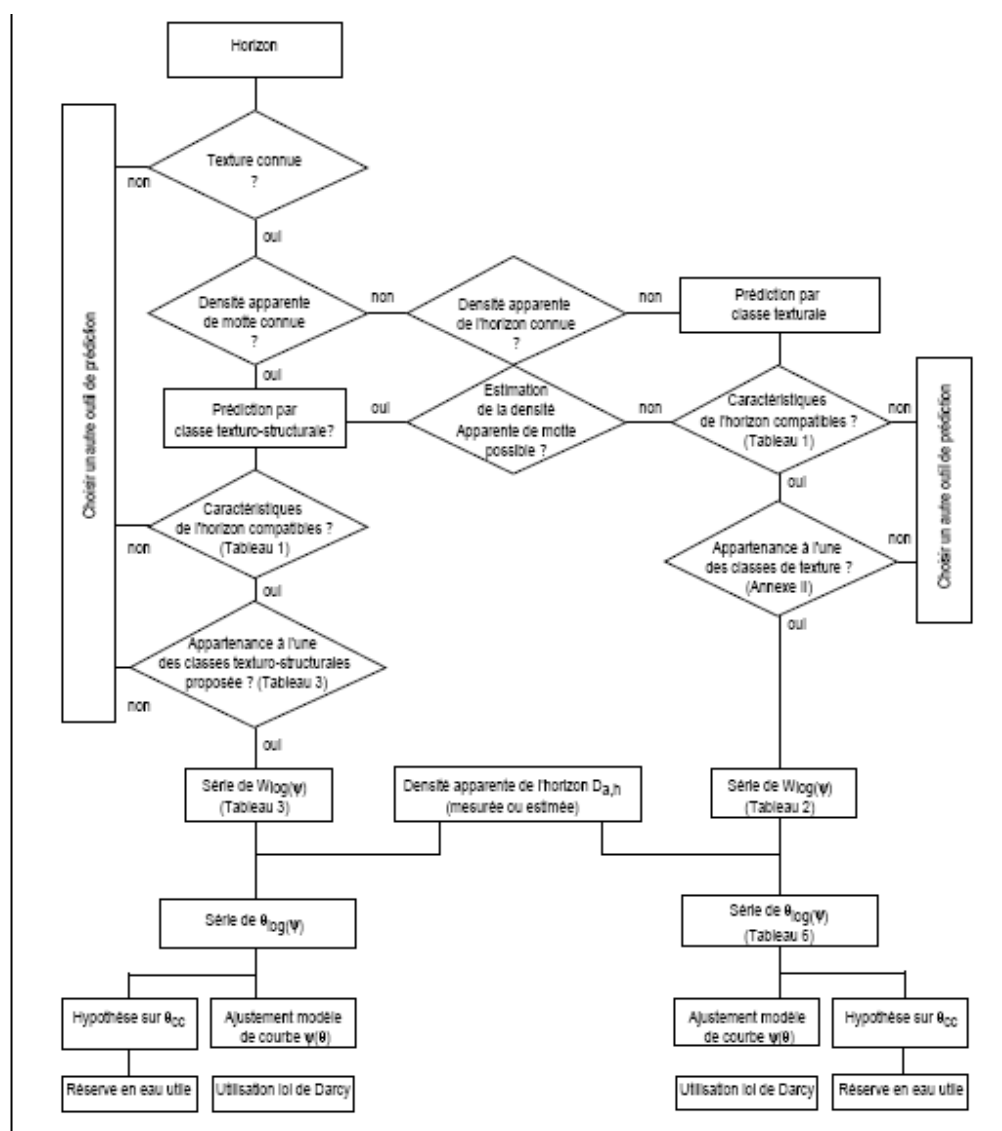
Pour prédire les propriétés de rétention en eau d'un horizon à l'aide des CPT proposées, il est nécessaire de connaître sa texture, qu'elle ait été déduite de l'analyse granulométrique ou estimée à partir d'un test sur le terrain. Si la texture n'est pas connue, les CPT proposées dans cette étude ne peuvent pas être utilisées. La texture de l'horizon étant connue, trois cas peuvent se présenter (*figure 4*) : (i) On ne connaît ni  $D_{a,m}$ , ni  $D_{a,h}$ , il faut alors se limiter à utiliser les CPT par classe texturale qui sont proposées *tableau 2* ; (ii) On ne connaît pas  $D_{a,m}$  mais on connaît  $D_{a,h}$  ; on peut alors soit en déduire  $D_{a,m}$  et l'on est ramené au cas précédent, soit on ne le peut pas et l'on est ramené au cas suivant ; (iii) On connaît  $D_{a,m}$  ; on peut alors envisager d'utiliser les CPT par classe texturo-structurale qui sont proposées *tableau 3*.

	n	Erreur moyenne de prédiction (EMP) -15 000 hPa g g <sup>-1</sup>	Ecart type de prédiction (ETP) -15 000 hPa g g <sup>-1</sup>
Argile lourde (ALO)	78	-0,046	0,032
sédimentaire d'altération	20	0,029	0,032
Argileux (A)	15	0,103	0,019
Argile limoneuse (AL)	40	0,039	0,027
Argile sableuse (AS)	7	0,088	0,026
Limon argileux (LA)	22	0,012	0,014
Limon moyen (LM)	8	0,014	0,018
Limon léger (LL)	-	-	-
Limon argilo-sableux (LAS)	11	0,012	0,026
Limon sablo-argileux (LSA)	6	0,010	0,015
Limon moyen sableux (LMS)	2	0,006	0,006
Limon sableux (LS)	-	-	-
Limon léger sableux (LLS)	-	-	-
Sable argileux (SA)	3	0,001	0,019
Sable limoneux (SL)	3	-0,008	0,016
Sable (S)	2	-0,011	0,027
Triangle de texture simplifié			
Argile lourde (ALO)	98	-0,031	0,044
Argile (A, AL)	55	0,057	0,038
Argile sableuse (AS)	7	0,088	0,026
Limon (LM, LA)	30	0,012	0,015
Limon sableux (LMS, LAS)	13	0,011	0,024
Limon très sableux (LS, LSA)	6	0,010	0,015
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	6	-0,004	0,020
Sable (S)	2	-0,011	0,039
Toutes textures réunies	217	0,006	0,039

**Tableau 5** – Comparaison de la teneur en eau massique proposée au point de flétrissement par Jamagne *et al.* (1977) à celle mesurée à  $-15\ 000$  hPa pour les horizons de l'ensemble test (217 horizons, cf. *tableau 1*).

Classe de texture	Classe de $D_{a,m}$	Valeur estimée de $D_{a,h}$	Teneur en eau volumique $\theta_{vol}$						
			$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
Argile lourde (ALO)	[1,2-1,3]	1,25	0,538	0,521	0,500	0,473	0,440	0,428	0,330
		1,15	0,485	0,480	0,460	0,435	0,405	0,393	0,304
	[1,3-1,4]	1,35	0,473	0,467	0,451	0,428	0,400	0,378	0,305
		1,25	0,438	0,433	0,418	0,396	0,370	0,350	0,283
	[1,4-1,5]	1,45	0,460	0,467	0,451	0,434	0,403	0,379	0,315
		1,35	0,447	0,435	0,420	0,404	0,375	0,352	0,293
	[1,5-1,6]	1,55	0,402	0,395	0,388	0,374	0,349	0,324	0,287
		1,45	0,376	0,370	0,363	0,350	0,326	0,303	0,268
Argile (A, AL)	[1,6-1,7]	1,65	0,376	0,381	0,348	0,333	0,317	0,300	0,266
		1,55	0,353	0,340	0,327	0,313	0,288	0,262	0,250
	[1,4-1,5]	1,45	0,381	0,385	0,344	0,318	0,284	0,247	0,216
		1,35	0,365	0,340	0,320	0,296	0,265	0,230	0,201
	[1,5-1,6]	1,55	0,363	0,357	0,324	0,321	0,291	0,258	0,223
		1,45	0,339	0,334	0,303	0,300	0,273	0,239	0,209
	[1,6-1,7]	1,65	0,374	0,380	0,345	0,329	0,300	0,269	0,228
		1,55	0,352	0,338	0,324	0,308	0,282	0,253	0,214
	[1,7-1,8]	1,75	0,348	0,347	0,329	0,306	0,288	0,265	0,240
		1,65	0,328	0,327	0,310	0,289	0,261	0,269	0,226
Argile sableuse (AS)	[1,8-1,9]	1,85	0,317	0,308	0,288	0,283	0,267	0,278	0,233
		1,75	0,300	0,292	0,280	0,268	0,271	0,263	0,221
	[1,5-1,7]	1,60	0,358	0,341	0,325	0,317	0,280	0,259	0,206
		1,50	0,336	0,320	0,305	0,287	0,263	0,243	0,194
Limon (LM, LA)	[1,7-1,9]	1,80	0,333	0,328	0,308	0,290	0,274	0,245	0,216
		1,70	0,315	0,308	0,291	0,274	0,258	0,231	0,204
	[1,4-1,5]	1,45	0,388	0,385	0,351	0,305	0,294	0,183	0,155
		1,35	0,369	0,340	0,327	0,284	0,217	0,170	0,145
	[1,5-1,6]	1,55	0,369	0,352	0,341	0,302	0,253	0,195	0,163
		1,45	0,345	0,328	0,319	0,283	0,238	0,183	0,152
Limon sableux (LMS, LAS)	[1,6-1,7]	1,65	0,371	0,380	0,343	0,320	0,288	0,211	0,173
		1,55	0,349	0,338	0,322	0,300	0,250	0,198	0,163
	[1,5-1,6]	1,55	0,365	0,344	0,313	0,258	0,209	0,189	0,160
		1,45	0,332	0,322	0,293	0,242	0,188	0,177	0,149
Limon très sableux (LTS, LSA)	[1,6-1,7]	1,65	0,365	0,345	0,325	0,290	0,238	0,182	0,144
		1,55	0,333	0,324	0,305	0,273	0,222	0,171	0,135
	[1,7-1,8]	1,75	0,324	0,301	0,308	0,292	0,245	0,208	0,137
		1,65	0,305	0,284	0,280	0,276	0,231	0,198	0,129
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	[1,5-1,7]	1,60	0,334	0,310	0,282	0,246	0,214	0,182	0,160
		1,50	0,314	0,291	0,264	0,231	0,201	0,171	0,150
	[1,7-1,9]	1,80	0,317	0,304	0,288	0,270	0,252	0,211	0,180
		1,70	0,299	0,287	0,272	0,255	0,238	0,199	0,151
Sable (S)	[1,6-1,75]	1,68	0,308	0,286	0,254	0,212	0,180	0,148	0,121
		1,58	0,288	0,268	0,239	0,199	0,169	0,139	0,144
	[1,75-1,9]	1,83	0,317	0,297	0,262	0,225	0,185	0,157	0,119
		1,73	0,289	0,280	0,247	0,213	0,174	0,149	0,113
Sable (S)	[1,6-1,7]	1,65	0,279	0,228	0,183	0,140	0,112	0,088	0,061
		1,55	0,262	0,216	0,154	0,132	0,105	0,081	0,067
	[1,7-1,8]	1,75	0,236	0,207	0,133	0,107	0,075	0,067	0,058
		1,65	0,223	0,195	0,125	0,101	0,071	0,063	0,055

**Tableau 7** – Teneurs en eau volumiques aux différents potentiels de l'eau calculés à partir des classes de pédotransfert proposées après stratification texturo-structurales (*tableau 3*) et pour différentes valeurs de densité apparente de l'horizon ( $D_{a,h}$ ) estimées à partir de la valeur médiane de la densité apparente de motte ( $D_{a,m}$ ) au sein de chaque classe de  $D_{a,m}$ .



**Figure 4** – Diagramme présentant la démarche de prédiction des propriétés de rétention en eau d'un horizon.

Classe de texture	Valeur estimée de $D_{a,h}$	Paramètres du modèle de van Genuchten				$R^2$
		$\theta_s$	$\theta_r$	$n$	$\alpha$	
Argile lourde (ALO)	1,4	0,454	<0,001	1,088	0,0055	0,982
	1,3	0,422	<0,001	1,088	0,0055	0,983
Argile (A, AL)	1,6	0,361	<0,001	1,060	0,0115	0,997
	1,5	0,338	<0,001	1,060	0,0111	0,997
Argile sableuse (AS)	1,7	0,337	<0,001	1,086	0,0135	0,992
	1,6	0,317	<0,001	1,086	0,0130	0,993
Limon (LM, LA)	1,5	0,351	0,087	1,319	0,0052	0,997
	1,4	0,328	0,081	1,319	0,0052	0,997
Limon sableux (LMS, LAS)	1,6	0,342	0,061	1,261	0,0071	0,999
	1,5	0,321	0,056	1,260	0,0072	0,999
Limon très sableux (LS, LSA)	1,7	0,327	<0,001	1,131	0,0163	0,994
	1,6	0,308	<0,001	1,130	0,0166	0,994
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	1,7	0,323	0,016	1,178	0,0442	0,999
	1,6	0,304	0,019	1,182	0,0418	0,999
Sable (S)	1,6	0,291	0,032	1,293	0,1311	0,998
	1,5	0,272	0,033	1,300	0,1250	0,998

$D_{a,h}$ : densité apparente de l'horizon.

**Tableau 8** – Paramètres du modèle de courbe proposé par van Genuchten (1980) obtenus après ajustement sur les teneurs en eau volumiques calculées aux différentes valeurs de potentiel (*tableau 6*).

### Utilisation des CPT par classes texturales

Si l'on est dans le premier cas, il est nécessaire de vérifier que les autres caractéristiques connues de l'horizon dont on cherche à prédire les propriétés de rétention en eau sont proches des propriétés des horizons ayant été utilisés pour établir les CPT que l'on désire utiliser (*tableau 1*). Si l'une ou l'autre de ces caractéristiques est très différente, il y a alors lieu de s'interroger sur les conséquences pour les propriétés de rétention en eau et, *in fine*, sur la pertinence qu'il y a à utiliser les CPT proposées. Une fois cette étape franchie, il faut vérifier que la texture de l'horizon correspond à l'une de celles pour lesquelles des CPT sont proposées (*tableau 2*). C'est le cas pour toutes les classes de texture du triangle du Service de la Carte de l'Aisne (Jamagne, 1967) excepté pour les textures LL et LLS. Il faut aussi vérifier une nouvelle fois que les caractéristiques de l'horizon sont proches de celles des horizons appartenant à la classe texturale utilisée pour définir les CPT (*Annexe II*). Dans le cas contraire il y a une nouvelle fois lieu de s'interroger sur la pertinence qu'il y a à utiliser les CPT proposées. Ces différentes conditions étant satisfaites, on dispose alors de valeurs de teneur en eau massique ( $W_{log|\Psi|}$ ) à 7 valeurs de potentiel (*tableau 2*) qui doivent être transformées en teneurs en eau volumique ( $\theta_{log|\Psi|}$ ) à l'aide de la densité apparente de l'horizon ( $D_{a,h}$ ).  $D_{a,h}$  n'étant pas connu, on utilise soit  $D_{a,m}^*$  de la classe de texture considérée (*tableau 2*) lorsque l'horizon considéré possède peu ou très peu de macroporosité, soit  $D_{a,m}^* - 0,1$  lorsqu'une macroporosité est présente. L'utilisation d'une valeur de  $D_{a,h}$  inférieure à celle de  $D_{a,m}$  ne devrait avoir lieu que dans des cas très particuliers. En effet, diminuer  $D_{a,m}$  de 0,1 correspond à une augmentation de porosité de l'ordre de 3 à 4 %. On obtient ainsi les valeurs de  $\theta_{log|\Psi|}$  présentées *tableau 6*. Ces valeurs de  $\theta_{log|\Psi|}$  peuvent ensuite être utilisées de plusieurs façons. Si l'on désire procéder à une description des transferts d'eau en utilisant des modèles de « type réservoir », ceux-ci requièrent qu'une borne haute et une borne basse soient fixées pour  $\theta$ . Il faut alors choisir les valeurs de potentiel correspondant à ces deux bornes. Concernant la teneur à la capacité au



champ, rappelons que les comparaisons qui ont été réalisées entre les mesures de terrain et celles au laboratoire, ont montré que la teneur en eau à la capacité au champ correspondait fréquemment à des teneurs en eau mesurées au laboratoire entre  $-33$  (pF = 1,5) et  $-100$  hPa (pF = 2,0) et qu'aucune tendance ne se dégagait en fonction de la texture. On peut aussi utiliser les valeurs de  $\theta$  proposées pour mettre en oeuvre des modèles de transfert basés sur l'utilisation de la loi de Darcy. Dans ce cas, on doit alors disposer d'une courbe pour  $\Psi(\theta)$  qui soit continue et dérivable. On peut alors utiliser les valeurs de  $\theta_{\log|\Psi}$  pour ajuster un modèle de courbe de  $\Psi(\theta)$  tel que le modèle de van Genuchten (1980) (*tableau 8*).

### Utilisation des CPT par classes texturo-structurales

Si l'on connaît la texture et la densité apparente à l'échelle de mottes de dimensions centimétriques ( $D_{a,m}$ ), il faut tout d'abord procéder comme dans le cas précédent et vérifier que les caractéristiques de l'horizon sont proches de celles des horizons utilisés pour établir les CPT proposées dans cette étude (*tableau 1*). Dans le cas contraire, comme précédemment, il y a lieu de s'interroger sur la pertinence qu'il y a à utiliser les CPT proposées. Ensuite, on doit vérifier que le couple de valeurs « texture » - « densité apparente de motte » correspond à l'un des cas présentés dans le *tableau 3*. Dans le cas contraire, les CPT proposées ne peuvent pas être utilisées. Une fois identifiée la classe texturostructurale correspondant à l'horizon en question, on peut comme précédemment déduire des valeurs de  $\theta_{\log|\Psi}$  celles de  $W_{\log|\Psi}$  à l'aide de  $D_{a,h}$ .  $D_{a,h}$  est alors égal à la médiane de la classe de  $D_{a,m}$  considérée, soit à cette valeur diminuée de 0,1 pour les mêmes raisons que dans la première méthode. Une fois calculées, les valeurs de  $\theta_{\log|\Psi}$  pourront être utilisées, comme à l'issue de la prédiction par classe de texture, pour mettre en oeuvre des modèles utilisant une analogie avec un réservoir ou la loi de Darcy.

### Cas intermédiaire

Lorsque l'on ne connaît pas  $D_{a,m}$  mais en revanche  $D_{a,h}$ , il peut se présenter deux cas. Soit on peut inférer  $D_{a,m}$  à partir de  $D_{a,h}$ , on est alors ramené à utiliser les CPT établies par classes texturo-structurales. C'est le cas, par exemple, d'horizons B pour lesquels la macroporosité est très faible. On peut alors faire l'hypothèse que  $D_{a,h} = D_{a,m}$ . Si la porosité est un peu plus développée, on peut considérer que  $D_{a,m} = D_{a,h} + 0,1$ . En revanche, il n'est guère envisageable d'inférer  $D_{a,m}$  à partir de  $D_{a,h}$  lorsqu'il s'agit d'horizons superficiels travaillés dans lesquels la macroporosité peut représenter une proportion importante de la porosité totale et au sein desquels des mottes de  $D_{a,m}$  différents coexistent fréquemment. D'une façon générale, il est vivement recommandé de procéder avec prudence lorsqu'il s'agit d'établir une relation entre  $D_{a,h}$  et  $D_{a,m}$ .

### Conclusion

Les classes de pédotransfert (CPT) proposées dans cette étude devraient permettre d'améliorer pour de nombreux sols la prédiction que nous faisons jusqu'alors de leurs propriétés de rétention en eau. Il serait néanmoins exagéré de penser que ces CPT, bien que correspondant à une large gamme de textures et de densités apparentes, puissent conduire à une prédiction satisfaisante des propriétés de rétention en eau pour l'ensemble des sols du territoire national.

De nombreux sols n'ont effectivement pas été pris en compte dans cette étude. Les sols sableux et argilo-sableux sont en effet peu représentés dans notre échantillon. Plusieurs matériaux parentaux comme les altérites issues de roches magmatiques et métamorphiques ne sont pas non plus pris en compte. Des horizons de surface travaillés sont présents mais leur échantillonnage n'a que rarement été réalisé en prenant en compte les variations d'état structural existant au sein de ces horizons. Or, comme pour les horizons pédologiques, ces variations d'état structural ont d'importantes conséquences sur les propriétés de rétention en eau (Papy, 1984 ; Curmi, 1987 ; Richard *et al.*, 2001).

Pour ces différentes raisons, il est nécessaire de rester prudent lors de l'utilisation des CPT proposées. Elles correspondent encore à une gamme limitée de sols du territoire. Les CPT proposées permettent de valoriser les résultats du programme de mesures conduit par l'INRA depuis une dizaine d'années. C'est un état des lieux qu'il était nécessaire de faire tant les demandes sont nombreuses quand il s'agit de la connaissance des propriétés de rétention en eau des sols. Pour répondre encore mieux à ces demandes, il faudra accroître nos connaissances dans ce domaine, enrichir nos jeux de données pour tester les CPT déjà disponibles et pour se donner les moyens d'identifier de nouveaux critères de stratification (matériau parental, minéralogie des argiles, limites de composition granulométrique correspondant aux classes de texture, caractéristiques de la fraction organique...) qui permettent de structurer notre démarche et qui aboutissent à l'établissement d'outils d'estimations qui soient les plus performants possibles.

**Remerciements :** Les auteurs remercient Pierre Stengel et Claude Cheverry pour leurs commentaires lors de la relecture de cet article. Les données utilisées dans cette étude ont été acquises dans le cadre de programmes soutenus financièrement par le Conseil Régional de la Région Centre.

### **Bibliographie**

Bastet G., 1999 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert : développement de nouvelles approches. Thèse Université d'Orléans, 214 p.

Bastet G., Bruand A., Quétin P., Cousin I., 1998 - Estimation des propriétés de rétention en eau à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols*, 1, 7-28.

Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quétin P., 1999 - Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils. In : M. Th. Van Genuchten, F.J. Leij, L. Wu (eds), *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, Riverside, California, October 22-24, 981-992.

Bouma J., van Lanen H.A.J., 1987 - Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. p 106-111. In : Beek K.J., P.A. Burrough and D.E. McCormack (eds.), *Proc. ISSS/SSSA Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures*. Int. Inst. for Aerospace Surv. and Earth Sci., Publ. N° 6, Enschede, The Netherlands.

Bruand A., 1990 - Improved prediction of water retention properties of clayey soils

Bruand A., Baize D., Hardy M., 1994 - Prediction of water retention properties of clayey soils : validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use Manage.*, 10, 3, 99-103.

Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3(1), 27-40.

Bruand A., Tessier D., 2000 - Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments : Significance of parent material and soil history. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 679- 688.

Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R., 1984 - A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 20(6), 682-690.

Curmi P., 1987 - Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosité différente. In: *Soil Compaction and Regeneration* (G. Monnier & M.J. Goss, eds.), Proc. Workshop on Soil Compaction : Consequences and Structural Regeneration Processes, Avignon 17-18 September 1985, Balkema, Rotterdam.

De Jong R., Campbell C.A., Nicholaichuk W., 1983 - Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 291-302.

van Genuchten M.Th., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.

van Genuchten M.Th., Leij F.J., Yates S.R., 1991 - The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA. United States Environmental Protection Agency, document EPA/600/2-91/065.

Gupta S.C., Larson W.E., 1979 - Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resour. Res.*, 15(6), 1633-1635.

Hall D.G., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F., 1977 - Water retention, porosity and density of field soils. Technical Monograph. N°9. Soil Survey of England & Wales, Harpenden.

Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une catographie des sols. *Ann. Agron.*, n° hors série, 18, 142 p.

Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977 - Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*. 324-325, 627-641.

Kern J.S., 1995 - Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1134-1141.

Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24, 533-545.

Papy F., 1984 - Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Effets des conditions climatiques et de l'état structural. Thèse INA PG, 232 p. + Annexes.

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Saxton K.E., 1982 - Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 26, 1747-1752.

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Soni B., 1983 - Agricultural management effects on soil water processes, Part I. Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. Trans. ASAE, 26, 1747-1752.

Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1985 - Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In : E. Jones and T.J Ward (ed.) Watershed Manage. Eighties. Proc. Symp. ASCE, Denver, CO. 30 Apr. - 2 May 1985. ASCE, New York. 293-299.

Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guérif J., 2001 - Effect of compaction on the porosity of a silty soil : influence on unsaturated hydraulic properties. Eur. J. Soil Sci., 52, 49-58.

Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I., 1986 - Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1031-1036.

Tessier D., Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. Science du Sol, 1, 67-82.

Tietje O., Tapkenhinrichs M., 1993 - Evaluation of pedotransfer functions. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 1088-1095.

Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P., 1989 - Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. Soil Science, 148(6), 389-403.

Wösten J.H.M, Finke P.A., Jansen M.J.W., 1995 - Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. Geoderma, 66, 227-237.

## **Annexe I**

### **Validité des valeurs de teneur en eau proposées par Jamagne et al. (1977) pour la capacité au champ et le point de flétrissement**

Les valeurs de teneur en eau à la capacité au champ (CC) proposées par Jamagne *et al.* (1977) sont celles obtenues par le Service de Cartographie des Sols de l'Aisne. Jamagne *et al.* (1977) précisent à ce propos que « *Dans une région donnée, l'examen de l'ensemble des résultats obtenus par un inventaire et une cartographie détaillée sur des matériaux connus permet d'établir une corrélation entre les unités texturales et la réserve en eau* ». De la sorte, à la différence de ce qui s'est produit depuis leur publication, les valeurs proposées n'auraient dû être utilisées que pour des sols des régions cartographiées par le Service de Cartographie des Sols de l'Aisne et leur utilisation pour d'autres sols aurait toujours dû faire l'objet d'une phase préalable de validation.

La comparaison de la teneur en eau lors du prélèvement, et par conséquent en conditions hydriques proches de la capacité au champ (cf. paragraphe « Méthodes mises en oeuvre »), avec les teneurs en eau obtenues aux différents potentiels a montré que la teneur en eau lors du prélèvement était intermédiaire entre celles enregistrées à -33 hPa (pF = 1,5) et -100 hPa (pF = 2,0), tout en étant fréquemment très proche de celle déterminée à -100 hPa. Par conséquent, la teneur en eau déterminée à -100 hPa peut être considérée comme étant une approximation par défaut de la teneur en eau à CC. Afin de quantifier dans quelle mesure les teneurs en eau à CC proposées pour

chaque classe de texture par Jamagne *et al.* (1977) étaient utilisables pour notre ensemble d'horizons, nous les avons comparées à celles déterminées à -100 hPa. L'erreur moyenne de prédiction (EMP) (cf. paragraphe « Méthodes mises en oeuvre »), toutes textures réunies, est de 0,054 g g<sup>-1</sup> et l'écart type de prédiction (ETP) de 0,028 g g<sup>-1</sup> (Tableau ci-après). Les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977) conduisent ainsi à une surestimation très élevée de la teneur en eau à CC. L'analyse par classe de texture montre que c'est pour les classes de texture AS, A, AL, et ALO-altération que la surestimation est la plus élevée. En revanche, pour la classe de texture ALO-sédimentaire, on enregistre une sous estimation très nette de la teneur en eau à CC lorsqu'on utilise les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977). La distinction introduite par Jamagne *et al.* (1977) entre les textures ALO héritées de processus d'altération et de pédogenèse (teneur en eau moyenne à CC de 0,38 g g<sup>-1</sup>) et celles héritées de matériaux parentaux sédimentaires argileux (teneur en eau à CC de 0,29 g g<sup>-1</sup>) conduit à des valeurs de teneur en eau à CC largement surestimées dans le premier cas et largement sous estimées dans le second. Pour les autres classes de texture, les EMP sont inférieures en valeur absolue à celles enregistrées pour les classes de texture argileuses. Elles sont cependant encore soit largement positives (classes de texture LA, LAS, LSA et SA), soit négatives (classes de texture S et SL). Ce n'est finalement que pour les classes de texture LMS et LM que la valeur de EMP est faible ( $\leq 0,005$  g g<sup>-1</sup>). Par conséquent, la teneur en eau à CC proposée par Jamagne *et al.* (1977) n'étant convenablement estimée que pour les seules classes de texture LMS et LM, il apparaît que les valeurs proposées par ces auteurs ne peuvent être appliquées à notre ensemble d'horizons de sols, le biais d'estimation étant beaucoup trop élevé pour la plupart des classes de texture.

La teneur en eau au point de flétrissement proposée par Jamagne *et al.* (1977) a aussi été comparée à celle mesurée à -15000 hPa (Tableau ci-joint). L'erreur moyenne de prédiction, toutes textures réunies, est de 0,024 g g<sup>-1</sup> et la précision de 0,018 g g<sup>-1</sup>. Si l'erreur moyenne de prédiction, toutes textures réunies, indique une surestimation de la teneur en eau moins élevée que pour la capacité au champ, il n'en demeure pas moins que la surestimation est trop importante pour que les valeurs proposées puissent être appliquées à notre ensemble d'horizons de sols. Enfin, on note que la surestimation concerne l'ensemble des classes de texture excepté, comme lors de l'estimation de la teneur en eau à la capacité au champ, les classes S, SL et ALO-sédimentaires.

	n	Erreur moyenne de prédiction (EMP)		Ecart type de prédiction (ETP)	
		-100 hPa (pF=2,0)	-15000 hPa (pF=4,2)	-100 hPa (pF=2,0)	-15000 hPa (pF=4,2)
		g g <sup>-1</sup>		g g <sup>-1</sup>	
Argile lourde (ALO) sédimentaire	31	-0,068	-0,068	0,056	0,030
d'altération	14	0,156	0,083	0,029	0,013
Argile (AL)	49	0,106	0,046	0,023	0,015
Argileux (A)	9	0,187	0,124	0,020	0,013
Argile sableuse (AS)	9	0,149	0,097	0,022	0,011
Limon argileux (LA)	26	0,066	0,019	0,014	0,020
Limon moyen (LM)	9	0,004	0,019	0,019	0,011
Limon léger (LL)	0	-	-	-	-
Limon argilo-sableux (LAS)	17	0,045	0,020	0,011	0,018
Limon sablo-argileux (LSA)	9	0,060	0,014	0,014	0,010
Limon moyen sableux (LMS)	15	0,005	0,013	0,017	0,012
Limon sableux (LS)	1	0,034	0,029	-	-
Limon léger sableux (LLS)	0	-	-	-	-
Sable argileux (SA)	8	0,042	0,020	0,020	0,015
Sable limoneux (SL)	9	-0,023	-0,006	0,018	0,014
Sable (S)	11	-0,012	-0,007	0,033	0,019
Toutes textures réunies	219	0,034	0,024	0,026	0,018

Comparaison des valeurs proposées pour la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par Jamagne *et al.* (1977) avec les teneurs en eau mesurées à respectivement –100 et –15 000 hPa.

## Annexe II

### Composition des ensembles d'horizons obtenus après stratification par classe de texture (triangle de l'Aisne) et teneur en eau aux différentes valeurs de potentiel.

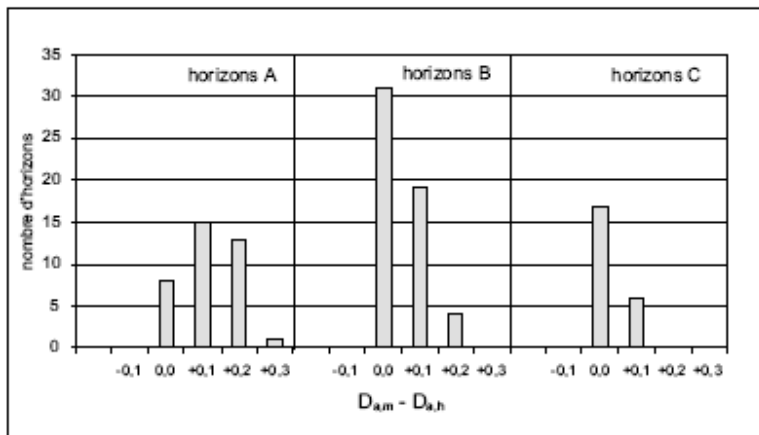
Pour établir ce tableau tout en disposant d'un effectif d'au moins une dizaine d'horizons par classe, nous avons été amenés à regrouper des classes de texture du triangle de l'Aisne: Argile lourde (ALO), Argile (A = A + AL), Argile sableuse (AS), Limon argileux (LA = LM + LA), Limon sableux (LS = LMS + LAS), Limon très sableux (LTS = LS + LSA), Sable argilo-limoneux (SAL = SL + SA) et Sable (S).

Texture et effectif (n)		Granulométrie $\mu\text{m}$			CO  $\text{g kg}^{-1}$	CEC  $\text{cmol(+) kg}^{-1}$	$D_{a,m}$  $\text{g cm}^{-3}$	Teneur en eau aux différents potentiels $W_{\log \Psi }$						
		<2	2	50				$W_{1,0}$	$W_{1,5}$	$W_{2,0}$	$W_{2,5}$	$W_{3,0}$	$W_{3,5}$	$W_{4,2}$
		%	%	%				$\text{g g}^{-1}$						
ALO (ALO) n = 45	Moyenne	58,7	28,9	11,3	8,2	28,2	1,43	0,327	0,321	0,310	0,295	0,277	0,262	0,216
	Ecart Type	8,2	9,8	10,1	5,0	6,1	0,18	0,083	0,081	0,077	0,073	0,067	0,066	0,042
	Minimum	44,0	11,9	0,2	0,9	20,5	1,15	0,179	0,186	0,182	0,173	0,166	0,164	0,149
	Maximum	77,5	52,0	37,3	21,8	39,2	1,85	0,473	0,463	0,454	0,435	0,424	0,380	0,295
A (A, AL) n = 58	Moyenne	34,6	52,8	21,5	5,3	19,9	1,82	0,225	0,220	0,209	0,197	0,182	0,163	0,140
	Ecart Type	3,5	14,2	12,8	4,2	5,2	0,11	0,031	0,027	0,025	0,024	0,019	0,017	0,016
	Minimum	30,1	13,8	1,3	1,1	6,6	1,43	0,154	0,161	0,146	0,129	0,129	0,117	0,107
	Maximum	45,0	67,2	45,9	14,9	26,2	1,86	0,280	0,269	0,254	0,244	0,222	0,207	0,179
AS (AS) n = 9	Moyenne	29,5	14,8	55,7	1,9	17,3	1,72	0,198	0,193	0,181	0,173	0,160	0,145	0,123
	Ecart Type	2,2	4,3	5,0	1,1	3,0	0,09	0,030	0,027	0,024	0,026	0,019	0,018	0,012
	Minimum	26,3	9,70	49,0	0,8	12,9	1,59	0,158	0,148	0,145	0,138	0,130	0,121	0,107
	Maximum	33,6	19,8	61,6	4,2	22,5	1,87	0,246	0,240	0,220	0,213	0,185	0,179	0,142
LA (LM, LA) n = 37	Moyenne	22,8	70,2	7,2	8,8	12,1	1,57	0,237	0,227	0,217	0,195	0,161	0,126	0,103
	Ecart Type	5,3	6,3	4,8	4,0	4,2	0,09	0,020	0,019	0,016	0,016	0,021	0,022	0,023
	Minimum	13,7	51,2	2,2	1,6	3,7	1,35	0,170	0,164	0,161	0,148	0,124	0,084	0,061
	Maximum	30,0	82,1	25,5	15,1	17,9	1,81	0,278	0,264	0,250	0,234	0,198	0,173	0,158
LS (LMS, LAS) n = 32	Moyenne	19,0	57,0	24,0	4,5	10,8	1,83	0,214	0,207	0,195	0,172	0,141	0,114	0,090
	Ecart Type	4,4	5,8	3,9	3,2	3,4	0,07	0,019	0,020	0,014	0,016	0,018	0,017	0,019
	Minimum	12,0	37,9	16,9	0,9	4,0	1,49	0,164	0,152	0,149	0,137	0,111	0,083	0,055
	Maximum	29,6	65,3	34,6	11,5	17,3	1,84	0,241	0,234	0,216	0,210	0,178	0,150	0,128
LTS (LS, LSA) n = 10	Moyenne	22,3	31,9	45,8	6,7	13,2	1,70	0,182	0,182	0,168	0,152	0,137	0,118	0,094
	Ecart Type	4,2	8,0	7,1	3,3	3,7	0,11	0,025	0,019	0,015	0,013	0,012	0,014	0,015
	Minimum	12,2	20,9	37,6	2,3	7,3	1,52	0,165	0,159	0,149	0,126	0,107	0,091	0,061
	Maximum	27,8	48,4	55,3	13,9	18,7	1,86	0,239	0,220	0,198	0,174	0,149	0,133	0,113
SAL (SL, SA) n = 17	Moyenne	12,8	17,4	70,0	8,0	9,7	1,73	0,182	0,186	0,146	0,122	0,101	0,085	0,067
	Ecart Type	3,8	5,1	5,6	3,1	3,1	0,12	0,024	0,018	0,020	0,023	0,026	0,020	0,020
	Minimum	7,8	5,4	58,4	1,7	6,0	1,48	0,145	0,133	0,116	0,079	0,057	0,045	0,039
	Maximum	22,1	24,9	79,2	11,2	14,1	1,88	0,255	0,198	0,179	0,158	0,155	0,126	0,115
S (S) n = 11	Moyenne	5,8	9,0	85,0	5,3	3,2	1,87	0,152	0,125	0,092	0,078	0,059	0,049	0,037
	Ecart Type	2,3	3,3	4,4	4,6	2,2	0,08	0,053	0,043	0,035	0,031	0,024	0,021	0,019
	Minimum	1,9	2,8	76,2	0,4	0,8	1,50	0,083	0,072	0,047	0,033	0,029	0,021	0,008
	Maximum	8,7	15,1	90,1	12,0	6,7	1,77	0,233	0,196	0,147	0,122	0,088	0,080	0,067

CO: teneur en carbone organique, CEC : Capacité d'échange cationique,  $D_{a,m}$  : Densité apparente des mottes de dimensions centimétriques,  $\theta_{\log|\Psi|}$ : Teneur en eau massique de l'horizon pour un potentiel de l'eau de  $\Psi$  (hPa).

### Annexe III

**Comparaison entre la densité apparente mesurée sur des mottes de dimensions centimétriques ( $D_{a,m}$ ) et celle mesurée à l'aide de la méthode au cylindre ( $D_{a,h}$ ).**



Les déterminations ont été réalisées sur 119 horizons. Les classes représentant la différence  $D_{a,m} - D_{a,h}$  sont centrées sur -0,1, 0,0, +0,1, +0,2, +0,3 et correspondent respectivement aux intervalles  $]-0,15, -0,05]$ ,  $]-0,05, +0,05]$ ,  $] +0,05, +0,15]$ ,  $] +0,15, +0,25]$  et  $] +0,25, +0,35]$ . Ces histogrammes montrent que la distribution de la valeur ( $D_{a,m} - D_{a,h}$ ) est cohérente avec la variation de macroporosité que l'on enregistre généralement dans les horizons A, B et C. Pour cette raison, lorsqu'il s'agit de calculer les teneurs en eau volumiques à partir des teneurs en eau massiques, nous avons considéré pour chaque classe de texture le cas où  $D_{a,h}$  est égal à la valeur moyenne de  $D_{a,m}$  (i.e.  $D^*_{a,m}$ ) arrondie au dixième inférieur et celui où  $D_{a,h}$  est égal à  $D^*_{a,m}$  arrondie au dixième inférieur et diminué de 0,1 (*tableau 6*). Lorsque la macroporosité est très développée, on peut bien évidemment calculer des teneurs en eau volumiques pour des valeurs de  $D_{a,h}$  égales à  $D^*_{a,m}$  arrondies au dixième inférieur et diminuées de 0,2 à partir des teneurs en eau massiques données dans le *tableau 2*.



## Annexe IV

### Classe de densité apparente de motte et teneur en eau massique aux différents potentiels de l'eau ( $W_{log(\Psi)}$ )

Classe de texture	Classe de $D_{a,m}$		$D_{a,m}$ g cm <sup>3</sup>	Teneur en eau massique $W_{log(\Psi)}$ g g <sup>-1</sup>						
				$W_{1,0}$	$W_{1,5}$	$W_{2,0}$	$W_{2,5}$	$W_{3,0}$	$W_{3,5}$	$W_{4,2}$
Argile Lourde (ALO)	[1.2-1.3]	Moyenne	1.248	0.430	0.417	0.400	0.378	0.352	0.342	0.284
		Ecart type	0.020	0.040	0.036	0.036	0.035	0.034	0.035	0.020
		Minimum	1.217	0.341	0.346	0.337	0.327	0.301	0.290	0.235
		Maximum	1.280	0.473	0.463	0.454	0.435	0.412	0.390	0.292
	[1.3-1.4]	Moyenne	1.361	0.360	0.346	0.334	0.317	0.298	0.280	0.226
		Ecart type	0.029	0.037	0.042	0.038	0.047	0.041	0.044	0.029
		Minimum	1.321	0.293	0.276	0.280	0.236	0.234	0.217	0.167
		Maximum	1.397	0.432	0.404	0.388	0.371	0.360	0.359	0.257
	[1.4-1.5]	Moyenne	1.460	0.331	0.322	0.311	0.299	0.278	0.261	0.217
		Ecart type	0.025	0.028	0.023	0.025	0.027	0.022	0.028	0.015
		Minimum	1.422	0.308	0.295	0.278	0.271	0.244	0.220	0.195
		Maximum	1.479	0.360	0.350	0.340	0.330	0.300	0.289	0.233
	[1.5-1.6]	Moyenne	1.543	0.259	0.255	0.250	0.241	0.225	0.209	0.185
		Ecart type	0.025	0.023	0.021	0.024	0.020	0.018	0.024	0.022
		Minimum	1.513	0.214	0.214	0.211	0.198	0.188	0.171	0.152
		Maximum	1.587	0.294	0.290	0.281	0.266	0.249	0.251	0.215
	[1.6-1.7]	Moyenne	1.659	0.228	0.219	0.211	0.202	0.192	0.182	0.161
		Ecart type	0.025	0.025	0.018	0.016	0.016	0.023	0.019	0.009
		Minimum	1.629	0.202	0.199	0.197	0.188	0.172	0.164	0.149
		Maximum	1.692	0.264	0.245	0.235	0.226	0.227	0.207	0.169
Argile (A, AL)	[1.4-1.5]	Moyenne	1.460	0.263	0.252	0.237	0.219	0.196	0.170	0.149
		Ecart type	0.023	0.008	0.005	0.007	0.008	0.013	0.011	0.010
		Minimum	1.427	0.247	0.245	0.227	0.210	0.182	0.153	0.137
		Maximum	1.490	0.272	0.259	0.251	0.234	0.219	0.199	0.163
	[1.5-1.6]	Moyenne	1.556	0.234	0.230	0.209	0.207	0.188	0.165	0.144
		Ecart type	0.028	0.028	0.019	0.021	0.024	0.022	0.018	0.016
		Minimum	1.513	0.154	0.164	0.152	0.129	0.129	0.117	0.111
		Maximum	1.600	0.280	0.259	0.254	0.244	0.222	0.192	0.167
	[1.6-1.7]	Moyenne	1.646	0.227	0.218	0.209	0.199	0.182	0.163	0.138
		Ecart type	0.021	0.013	0.012	0.012	0.010	0.012	0.016	0.017
		Minimum	1.603	0.201	0.199	0.190	0.185	0.165	0.143	0.118
		Maximum	1.686	0.247	0.240	0.230	0.215	0.210	0.198	0.179
	[1.7-1.8]	Moyenne	1.739	0.199	0.198	0.188	0.175	0.170	0.163	0.137
		Ecart type	0.030	0.018	0.016	0.012	0.009	0.012	0.023	0.014
		Minimum	1.706	0.166	0.166	0.165	0.163	0.143	0.130	0.117
		Maximum	1.786	0.223	0.223	0.202	0.192	0.186	0.207	0.164
	[1.8-1.9]	Moyenne	1.823	0.171	0.167	0.160	0.153	0.155	0.150	0.126
		Ecart type	0.021	0.011	0.004	0.009	0.006	0.004	0.005	0.015
		Minimum	1.802	0.158	0.161	0.146	0.144	0.150	0.143	0.107
		Maximum	1.855	0.187	0.172	0.171	0.160	0.161	0.154	0.141
Argile Sableuse (AS)	[1.5-1.7]	Moyenne	1.625	0.224	0.213	0.203	0.198	0.175	0.162	0.129
		Ecart type	0.061	0.032	0.032	0.026	0.025	0.016	0.017	0.017
		Minimum	1.585	0.187	0.178	0.173	0.169	0.156	0.145	0.110
		Maximum	1.665	0.246	0.240	0.220	0.213	0.185	0.179	0.142
	[1.7-1.9]	Moyenne	1.766	0.185	0.182	0.171	0.161	0.152	0.136	0.120
		Ecart type	0.061	0.020	0.020	0.015	0.017	0.016	0.011	0.010
		Minimum	1.701	0.156	0.148	0.145	0.136	0.130	0.121	0.107
		Maximum	1.873	0.209	0.201	0.188	0.181	0.165	0.149	0.133

Classe de texture	Classe de $D_{4,75}$		$D_{4,75}$	Teneur en eau massique $W_{H_2O}$						
			$\rho \text{ cm}^3$	$W_{1,0}$	$W_{1,5}$	$W_{2,0}$	$W_{2,5}$	$W_{3,0}$	$W_{4,0}$	$W_{4,2}$
Limon (LM, LA)	[1.4-1.5]	Moyenne	1.444	0.266	0.252	0.242	0.210	0.161	0.126	0.107
		Ecart type	0.024	0.011	0.010	0.010	0.007	0.035	0.041	0.037
		Minimum	1.408	0.251	0.239	0.229	0.204	0.126	0.090	0.079
		Maximum	1.480	0.275	0.264	0.250	0.219	0.194	0.173	0.158
	[1.5-1.6]	Moyenne	1.564	0.238	0.227	0.220	0.195	0.163	0.126	0.105
		Ecart type	0.024	0.011	0.012	0.009	0.016	0.019	0.019	0.019
		Minimum	1.515	0.220	0.213	0.205	0.170	0.132	0.098	0.088
		Maximum	1.600	0.260	0.260	0.240	0.234	0.196	0.160	0.140
	[1.6-1.7]	Moyenne	1.632	0.225	0.218	0.208	0.194	0.161	0.128	0.105
		Ecart type	0.023	0.012	0.013	0.011	0.012	0.022	0.024	0.025
		Minimum	1.608	0.202	0.195	0.190	0.178	0.125	0.084	0.074
		Maximum	1.664	0.238	0.233	0.222	0.210	0.196	0.163	0.143
Limon Sableux (LMS, LAS)	[1.5-1.6]	Moyenne	1.573	0.229	0.222	0.202	0.167	0.135	0.122	0.103
		Ecart type	0.020	0.007	0.009	0.007	0.014	0.017	0.022	0.019
		Minimum	1.548	0.219	0.212	0.192	0.146	0.111	0.083	0.078
		Maximum	1.600	0.236	0.234	0.216	0.185	0.163	0.150	0.124
	[1.6-1.7]	Moyenne	1.639	0.215	0.209	0.197	0.176	0.143	0.110	0.087
		Ecart type	0.030	0.014	0.012	0.010	0.015	0.019	0.015	0.017
		Minimum	1.603	0.180	0.174	0.166	0.144	0.119	0.091	0.055
		Maximum	1.686	0.241	0.228	0.207	0.210	0.178	0.140	0.128
	[1.7-1.8]	Moyenne	1.734	0.185	0.172	0.176	0.167	0.140	0.119	0.078
		Ecart type	0.031	0.018	0.011	0.017	0.011	0.013	0.016	0.019
		Minimum	1.715	0.167	0.159	0.157	0.155	0.130	0.105	0.063
		Maximum	1.770	0.202	0.181	0.188	0.176	0.155	0.136	0.100
Limon très Sableux (LS, LSA)	[1.5-1.7]	Moyenne	1.601	0.209	0.194	0.176	0.154	0.134	0.114	0.100
		Ecart type	0.071	0.025	0.019	0.016	0.018	0.016	0.011	0.013
		Minimum	1.520	0.173	0.168	0.152	0.126	0.107	0.085	0.080
		Maximum	1.678	0.239	0.220	0.198	0.174	0.148	0.125	0.113
	[1.7-1.8]	Moyenne	1.783	0.176	0.169	0.160	0.150	0.140	0.117	0.089
		Ecart type	0.041	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.017	0.017
		Minimum	1.754	0.165	0.159	0.149	0.140	0.131	0.091	0.081
		Maximum	1.862	0.185	0.178	0.170	0.160	0.149	0.133	0.102
	[1.6-1.75]	Moyenne	1.698	1.182	0.170	0.151	0.128	0.107	0.088	0.072
		Ecart type	0.043	0.013	0.018	0.017	0.025	0.030	0.023	0.025
		Minimum	1.637	0.168	0.152	0.119	0.087	0.080	0.049	0.039
		Maximum	1.733	0.196	0.196	0.166	0.158	0.155	0.126	0.115
	[1.75-1.8]	Moyenne	1.816	0.173	0.162	0.143	0.123	0.101	0.086	0.065
		Ecart type	0.050	0.017	0.020	0.022	0.019	0.021	0.014	0.012
		Minimum	1.751	0.145	0.133	0.119	0.100	0.080	0.067	0.042
		Maximum	1.880	0.197	0.188	0.179	0.158	0.137	0.107	0.078
Sable (S)	[1.6-1.7]	Moyenne	1.673	0.169	0.139	0.099	0.085	0.068	0.052	0.037
		Ecart type	0.033	0.065	0.045	0.031	0.031	0.024	0.025	0.023
		Minimum	1.620	0.090	0.094	0.055	0.051	0.039	0.023	0.008
		Maximum	1.700	0.233	0.196	0.127	0.111	0.088	0.080	0.052
	[1.7-1.8]	Moyenne	1.745	0.135	0.118	0.076	0.061	0.043	0.038	0.033
		Ecart type	0.032	0.067	0.055	0.048	0.041	0.025	0.024	0.023
		Minimum	1.704	0.083	0.072	0.047	0.033	0.029	0.021	0.017
		Maximum	1.770	0.201	0.168	0.147	0.122	0.081	0.073	0.067

[illegible]